

## Definitie van robuustheid voor een spoorwegdienstregeling.

### **Inleiding**

Een blik op de stipheidscijfers<sup>1</sup> van het eerste trimester van 2010 leert ons dat gemiddeld 17.5% van de passagiers te maken had met een vertraging van zes minuten of meer. Dit is een stijging van 4.5% ten opzichte van hetzelfde trimester vorig jaar. Meer zelfs, in elk kwartaal van 2009 was de punctualiteit hoger. De stiptheid in de acht grootste stations lag in de eerste drie maanden van dit jaar systematisch lager dan het gemiddelde van 2009. In de piekperiode zijn de cijfers nog duidelijker. 's Ochtends bereiken gemiddeld 81.7% van de treinen hun eindbestemming met minder dan 6 minuten vertraging. In de avondspits is dit slechts 79.7%, wat betekent dat 's avonds ruim 20% van de treinen een vertraging van minimum zes minuten heeft.

Als we de gegevens van de aansluitingen bekijken, zien we hetzelfde stramien. Het aantal verzekerde overstappen ligt in elk van de tien belangrijkste overtapstations lager dan in dezelfde periode vorig jaar. In totaal worden 15% van de overstappen gemist. Een mogelijke reden hiervoor kan gezocht worden in de stiptheid van de IC treinen. Langs de acht belangrijke IC lijnen rijden de helft van de treinen met een stiptheid van minder dan 80%.

Deze cijfers wijzen op een negatieve trend. Er zijn waarschijnlijk "verzachtende" omstandigheden, maar er is duidelijk verbetering mogelijk. Diverse ideeën voor het verbeteren van de stiptheid van treindienstregelingen zijn reeds besproken in de literatuur. Deze gaan van het opsplitsen van IC lijnen in kortere lijnen tot het herbekijken van de huidige dispatchingstrategie. Een van de meest gebruikte maatregelen is het verlengen van de geplande reistijd om zo reeds op voorhand te compenseren voor vertragingen.

Een studie naar de robuustheid van de Belgische spoorwegdienstregeling heeft voornamelijk als doel om de vertragingen en hun effect te verkleinen zodanig dat de hinder (voor de passagiers) minimaal wordt. In deze studie wordt dieper ingegaan op wat er concreet verstaan wordt onder robuustheid van een spoorwegdienstregeling; aan welke voorwaarden een robuuste dienstregeling moet voldoen; hoe de robuustheid gemeten kan worden; en hoe dit aansluit bij het huidige standpunt van Infrabel.

De focus van dit onderzoek ligt bij het opstellen van een dienstregeling in de planningsfase. Dit maakt dat aspecten zoals stiptheid en overstaptijd van belang zijn, maar aspecten zoals het aanbod (qua aantal en grootte) en het geven van informatie minder relevant zijn voor deze studie. We zijn er ons van bewust dat ook een aanpassing van de te volgen dispatchingstrategie of van de verdeling van de crew of de allocatie van het rollend materieel een duit in het zakje kunnen doen met betrekking tot de robuustheid, maar in deze fase van het onderzoek ligt de klemtoon op het opstellen van een robuuste dienstregeling conform alle voorschriften.

---

<sup>1</sup> Cijfers komen van de website van infrabel en zijn geraadpleegd op 14 juni 2010.  
[http://www.infrabel.be/portal/page/portal/pgr\\_inf2\\_e\\_internet/priorites/punctualite](http://www.infrabel.be/portal/page/portal/pgr_inf2_e_internet/priorites/punctualite)

Dit rapport is als volgt opgebouwd. In het volgende hoofdstuk wordt het kader waarbinnen gewerkt is geschetst en wordt wat achtergrondinformatie gegeven. In hoofdstuk 2 worden enkele definities van robuustheid voor een spoorwegdienstregeling gepresenteerd. Vertrekkende van wat er reeds in de literatuur gezegd is, wordt de huidige definitie die Infrabel hanteert bekeken. Dit vormt dan de basis voor de uiteindelijke definitie van robuustheid voor een spoorwegdienstregeling die als leidraad zal dienen voor de rest van dit onderzoek. Tot slot formuleren we de conclusies in Hoofdstuk 3.

## Hoofdstuk 1: Achtergrond

In dit hoofdstuk wordt zonder al te veel in detail te treden, dieper ingegaan op de state-of-the-art literatuur omtrent robuustheid van een spoorwegdienstregeling. De focus ligt voornamelijk op de planningsfase waarin de dienstregeling opgesteld wordt.

Aangezien principes zoals synchronisatie<sup>2</sup>, FCFS<sup>3</sup> en afschaffen of beperken van treinen, het verloop van treinen beïnvloeden, nemen we (on)bewust de huidige dispatchingstrategie in rekening bij het evalueren van de stiptheidscijfers en het percentage verzekerde aansluitingen. Zoals in de inleiding vermeld, kan ook tijdens de uitvoering (of tijdens andere fases zoals de lijnplanning<sup>4</sup>) aan een verbeterde robuustheid gewerkt worden<sup>5</sup>. Ook al valt dit (voorlopig) buiten het bestek van dit onderzoek, toch gaan we hier even dieper op in.

Het type voorbeeld van hoe dispatching kan bijdragen tot een verbeterde efficiëntie is te vinden in Zwitserland. De Zwitsers maken gebruik van realtime herplannen om de flow in de bottleneck regio's (de stationzones) zo vlot mogelijk te houden.

In België wordt dit principe niet gehanteerd. Het first-come-first-serve principe in Brussel is louter een dispatchingstrategie en vraagt geen herplanning. In een latere fase van dit onderzoek zal eventueel bekeken worden of een aanpassing van de dispatchingstrategie resulteert in een betere robuustheid. Hier vallen ook de regels voor het behouden van aansluitingen onder. In plaats van een maximum synchronisatietijd vast te leggen, kan gekeken worden naar de impact van het (niet) wachten op andere treinen of passagiers.

Het verschil met de planningsfase is dat tijdens de uitvoering de vertragingen gekend zijn. Tijdens de planningsfase is het onmogelijk om te weten welke trein wanneer vertraging zal hebben. Er bestaan wel statistische gegevens uit het verleden en verschillende manieren om met deze onzekerheid om

---

<sup>2</sup> Synchronisatie is het opleggen van een maximum wachttijd voor de connecterende trein in een station opdat een aansluiting verzekerd kan worden indien de aanvoerende trein vertraging heeft.

<sup>3</sup> First-come-first-serve, de dispatchingregel die gebruikt wordt om de volgorde van de treinen in Brussel te bepalen.

<sup>4</sup> Zie A. Marin, J.A. Mesa, and F. Perea. Integrating Robust Railway Network Design and Line Planning under Failures, pages 273-292. In: Robust and Online Large-Scale Optimization: Models and Techniques for Transportation Systems. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin/Heidelberg (2009).

<sup>5</sup> In deze context zegt Cicerone het volgende: *"The basic idea of robustness is to provide a solution which is able to keep feasibility even if the input instance is disturbed, [...] robustness is not always suitable unless some recovery strategies are introduced."*

Tijdens de uitvoering is robuustheid dus mate waarin een geen dienstregeling conflicten veroorzaakt.

Bron: S. Cicerone, G. D'Angelo, G. Di Stefano, D. Frigioni, A. Navarra, M. Schachtebeck, and A. Schöbel. Recoverable Robustness in Shunting and Timetabling, pp.28-60. In: Robust and Online Large-Scale Optimization: Models and Techniques for Transportation Systems. Lecture Notes in Computer Science (2009).

te gaan, zoals robuuste optimalisatie, stochastische optimalisatie, simulatie, ... In de volgende paragraaf gaan we hier verder op in.

## §1.1: Planningsfase

Als er gevraagd wordt om enkele activiteiten zo ‘goedkoop’ mogelijk te plannen zonder dat de exacte tijdsduur van die activiteiten gekend is, zijn er enkele mogelijke aanpakken. Ten eerste kan de tijdsduur onder ideale omstandigheden gebruikt worden. Vertaald naar de spoorwegcontext komt dit neer op het plannen van de minimum benodigde rij- en stoptijden, zonder extra's. Een tweede mogelijkheid is het tegengestelde, een planning die ook geldig is voor de worstcasescenario's. Op die manier zal er nooit een vertraging zijn, maar zal de reistijd tussen twee stations beduidend verhogen. Het is duidelijk dat deze aanpak<sup>6</sup> resulteert in een veel te traag treinverkeer. Een tussenoplossing is het creëren van een dienstregeling waarvan gezegd kan worden dat in -bijvoorbeeld- 90% van de gevallen de treinen geen vertraging zullen hebben. Maar ook hier kunnen vragen gesteld worden bij de haalbaarheid van deze aanpak. Een derde mogelijkheid om de planning op te stellen is met behulp van stochastisch optimaliseren<sup>7</sup>. Stochastisch optimaliseren maakt gebruik van een verzameling mogelijke vertragingen en zoekt de planning die gemiddeld gezien het beste resultaat geeft. Dit betekent dat de gemiddelde vertraging en de verdeling van die vertraging in rekening wordt gebracht. Het grootste nadeel van deze aanpak is dat het veel rekentijd vraagt, al is dit in de planningsfase niet onaanvaardbaar. Een laatste mogelijkheid die we hier bespreken is simulatie<sup>8</sup>. Het effect van vertragingen kunnen met behulp van simulatie gemeten worden. Het nadeel aan simulatie is dat het enkel een dienstregeling evalueert maar niet kan opstellen, wat in de voorgaande gevallen wel zo is. Daar tegenover staat echter het gebruiksgemak en de snelheid van simulatie.

Het opstellen van een spoorwegdienstregeling bestaat uit het vastleggen van de vertrek- en aankomsttijden. Een vraag die logischerwijs gesteld kan worden, is hoe het bepalen van die tijdstippen een effect heeft op de robuustheid van een dienstregeling. Het antwoord is eigenlijk al half gegeven in de vorige alinea; vergelijk daartoe de eerste twee aanpakken. De minimale reistijden tussen twee punten zijn gegeven en moeten gerespecteerd worden, maar in feite is er geen bovengrens op die reistijd<sup>9</sup>. Ook de spreiding van de treinen kan met het vastleggen van aankomst- en vertrektijden gemodelleerd worden. Bijvoorbeeld homogenisering<sup>10</sup> en het veranderen van de volgorde van de treinen, kan de mogelijke invloeden van een vertraagde trein op de andere beperken.

De meest frequent gebruikte techniek is die van stochastische optimalisatie, cfr supra, waarbij extra reis- en tussentijden verdeeld worden. Omdat in de rest van dit werk die extra geplande tijden, die ook wel supplementen en buffers genoemd worden, belangrijk zijn, gaan we er even dieper op in.

---

<sup>6</sup> In de literatuur wordt dit robuuste optimalisatie genoemd. Een algemeen besluit is dat robuuste optimalisatie te conservatief is en bovendien veel te duur in de context van de spoorwegen.

<sup>7</sup> L. Kroon, G. Maroti, M. Retel Helmrich, M. Vromans, and R. Dekker, Stochastic improvement of cyclic railway timetables. Transportation Research Part B: Methodological, 42(6):553 - 570 (2008).

<sup>8</sup> D. Middelkoop and M. Bouwman. Simone: large scale train network simulations. In: WSC '01: Proceedings of the 33rd conference on Winter simulation, Washington, pp. 1042-1047 (2001).

<sup>9</sup> Door het verlengen van de reistijd zullen er meer mensen en middelen ingezet moeten worden, maar die groei zal beperkt blijven.

<sup>10</sup> Met homogenisering wordt bedoeld het parallel maken van de tijd-plaats diagrammen, zie M. Vromans. Reliability of Railway Systems. PhD thesis, E.U.Rotterdam (2005).

## §1.2: Supplementen en buffers

Supplementen en buffers kunnen gedefinieerd worden als, respectievelijk, extra geplande tijden tussen twee gebeurtenissen van dezelfde trein en twee verschillende treinen. Met een gebeurtenis wordt de aankomst of vertrek van een trein in een station bedoeld.

Uit de definitie volgt dat een supplement de reistijd verlengt. De twee belangrijkste voorbeelden zijn een rijtijd supplement en een stoptijd supplement. De eerste voorziet een trein van meer tijd om zijn verplaatsing te maken, de tweede heeft als gevolg dat een langere in- en uitstaptijd niet onmiddellijk zorgt voor een vertraagd vertrek. In tegenstelling tot een supplement verlengt een buffer de reistijd van een trein niet. Een buffer vergroot de tijd tussen twee treinen. De twee belangrijkste voorbeelden zijn de veiligheid en overstap buffer. Een veiligheid buffer zorgt ervoor dat de geplande tijd tussen twee treinen op hetzelfde spoor of over dezelfde wissel groter is dan het minimum zodat een vertraging van de eerste niet onmiddellijk de tweede ophoudt. Een overstap buffer houdt in dat de voorziene overstaptijd tussen twee treinen groter is dan minimum noodzakelijk.

Samengevat kan gezegd worden dat zowel supplementen als overstap buffers de geplande reistijd van reizigers vergroten. Veiligheid buffers zorgen voor een ruimere spreiding in de tijd en beïnvloeden de reistijd van de passagiers niet. Aangezien de geplande reistijd groter wordt door het toevoegen van supplementen en overstap buffers, is het belangrijk om een afweging te maken tussen het verlengen van de geplande reistijd en het effect dat deze extra tijden hebben op de robuustheid<sup>11</sup>. Dit wordt vaak gedaan met stochastische optimalisatie, al gebruikt de studie van Vansteenwegen et al.<sup>11</sup> een andere aanpak. Door het gebruik van de vertrek- en aankomsttijden als variabelen die aan enkele eisen moeten voldoen (veiligheid, minimale procestijd, ...) en tegelijk een bepaalde kostfunctie moeten minimaliseren, worden de optimale supplementen en buffers gekozen voor die situatie. Zie Kroon et al.<sup>7</sup> voor een voorbeeld. Het bepalen van de manier waarop de optimalisatie gebeurt, is een belangrijk onderzoekspunt in de toekomst.

## §1.3: Kostfunctie

In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van enkele belangrijke concepten die nog niet ter sprake zijn gekomen. Zo wordt dieper ingegaan op de kostfunctie, cfr supra, en enkele eigenschappen die in verdere hoofdstukken van belang zijn.

Diverse mogelijke kostfuncties zijn reeds naar voor gekomen in het werk van andere auteurs. Enkele voorbeelden zijn: de gemiddelde vertraging, de punctualiteit, de passagiersreistijd, de totale passagiersvertraging, de totale tweede orde vertraging<sup>12</sup>, ... In het volgende hoofdstuk zal beargumenteerd worden dat het gebruik van deze kostfuncties de robuustheid van de dienstregeling verbetert maar dat teveel van het ene nadelig kan zijn voor het andere.

---

<sup>11</sup> Een concrete toepassing van die afweging is te vinden in: P. Vansteenwegen and D. Van Oudheusden. Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network. Transportation Research Part B: Methodological 41, pp.478 - 492 (2007).

<sup>12</sup> In het algemeen wordt een onderscheid gemaakt tussen vertragingen van de eerste en tweede orde. Eerste orde vertragingen of initiële vertragingen zijn vertragingen die veroorzaakt worden door langere procestijden. Bijvoorbeeld een langere in- en uitstaptijd omwille van de drukte. Tweede orde of secundaire vertragingen zijn vertragingen die veroorzaakt worden door een conflict met een andere vertraagde trein. Dus bijvoorbeeld wanneer een stipte trein opgehouden wordt door een vertraagde. Merk op dat buffers de secundaire vertraging beperken terwijl supplementen vertragingen van de eerste orde trachten tegen te gaan.

Een vaak terugkomende techniek<sup>13</sup> is het behandelen van de voortgang van de vertraging, de tweede orde vertragingen dus, met als bijhorende kostfunctie de totale vertraging of de stiptheid. Dit gebeurt aan de hand van een studie naar de invloeden van een vertraagde trein op andere, de zogenaamde “interdependencies”.

Net zoals Infrabel sinds enkele jaren de passagiersaantallen in rekening neemt voor de stiptheidscijfers, zo worden ook de reizigers al eens centraal gesteld in de literatuur. Bijvoorbeeld het beschouwen van de gemiddelde reistijd van alle reizigers of de passagiersvertraging als kostfunctie. In die gevallen worden de passagiersaantallen gebruikt als gewichten wat maakt dat druk bezette treinen belangrijker worden dan quasi lege treinen. Hierdoor wordt er ook meer gefocust op de spitsuren.

Een laatste mogelijkheid voor kostfunctie die nog niet ter sprake is gebracht, betreft de tijd dat een vertraging aanwezig blijft in het systeem. Dit geeft aan hoe veerkrachtig een dienstregeling is; anders gezegd, hoelang het duurt om een vertraging te absorberen en het opnieuw mogelijk is om volgens de planning te rijden. Om vertraging op een lijn weg te werken, moet er ergens op die lijn een overschot van tijd (supplement) zijn. Dus gegeven de beschikbare supplementen, kan de absorptietijd geschat worden, zie Goverde<sup>14</sup> voor een concreet voorbeeld.

## **Hoofdstuk 2: Definities van robuustheid van een spoorwegdienstregeling**

In dit hoofdstuk worden naast de huidige definitie die Infrabel hanteert ook enkele andere definities van robuustheid van een spoorwegdienstregeling gegeven. De overeenkomsten en gelijkenissen worden besproken. Dit laat toe om de belangrijkste aspecten die bijdragen tot een goede robuustheid te selecteren. Op basis hiervan wordt dan een nieuwe definitie van robuustheid van een spoorwegdienstregeling geformuleerd en beargumenteerd (§2.3).

### **§2.1: Definities uit literatuur**

Enkele auteurs hebben reeds een poging ondernomen om tot een definitie van robuustheid van een spoorwegdienstregeling te komen. We starten met twee citaten, een van Goverde en een van Vromans.

*“A robust timetable must be able to deal with a certain amount of delay without traffic control intervention. Timetable robustness therefore determines the effectiveness of schedule adherence after disruptions.”<sup>14</sup>*

Dit citaat bevat twee belangrijke punten. Eerst en vooral zegt het dat een robuuste dienstregeling geen realtime ingrepen nodig heeft indien er enkel vertragingen van een beperkte grootte zijn. Ten tweede wordt de afhankelijkheid van een dienstregeling naar voor geschoven als een maatstaf voor

---

<sup>13</sup> Een voorbeeld is te vinden in Vromans<sup>10</sup>.

<sup>14</sup> Bron: R.M.P. Goverde, Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis, PhD thesis, T.U.Delft (2005).

robuustheid. Dit tweede vat de kern van robuustheid samen: ook al zijn er beperkte verstoringen, toch moet het mogelijk zijn om volgens de dienstregeling te opereren.

*“The robustness of a railway system indicates the influenceability of the system by disturbances. A robust railway system can function fairly well under difficult circumstances. When a railway system is not robust, small external influences cause large delays which propagate quickly throughout the system in place and time. [...] Less delay propagation means a more robust timetable.”*<sup>10</sup>

Als een dienstregeling gevoelig is voor kleine vertragingen, dus als een kleine vertraging een domino-effect veroorzaakt, dan kan zonder uitsluitel gezegd worden dat die dienstregeling niet robuust is. De vraag is echter of het omgekeerde geldt: “Is een dienstregeling robuust enkel en alleen als zij ongevoelig is voor kleine vertragingen?” Bovendien is het onduidelijk wat er concreet bedoeld wordt met ‘ongevoelig’. De kleine vertragingen zijn makkelijker definieerbaar. Met een kleine vertraging bedoelen we in dit rapport alle vertragingen kleiner dan 10 minuten. Het is duidelijk dat kunnen omgaan –hoe vaag dit ook is– met kleine vertragingen helemaal anders is dan met grote vertragingen. Daarom ligt de focus van deze studie (voorlopig) enkel en alleen bij de kleine vertragingen<sup>15</sup>.

Om even terug te komen op het tweede citaat hierboven, de laatste zin zegt dat minder vertragingen zorgt voor een meer robuuste dienstregeling. Wat echter niet vermeld wordt, is welke eigenschappen ook bijdragen tot een grotere robuustheid en hoe robuustheid gemeten kan worden. In de rest van dit rapport wordt een poging gedaan om de hiaten in de definitie van robuustheid op te vullen. Enig realisme is echter noodzakelijk. In dit stadium van het onderzoek is het onmogelijk om met concreet cijfermateriaal over de brug te komen. Enige vaagheid over begrippen zoals bijvoorbeeld ‘ongevoelig’, zal dus blijven bestaan<sup>16</sup>; al hebben we ons best gedaan om zo concreet mogelijk te zijn.

Een andere visie op robuustheid is die van Schöbel. Zij definieert robuustheid op basis van overstappen.

*“Let a fixed waiting time rule<sup>17</sup> be given as well as a set of source-delayed events. A timetable has the robustness  $R$  if all its transfers are maintained whenever all source delays are smaller than or equal to  $R$ .”*<sup>18</sup>

In vergelijking met de definities van Vromans en Goverde is dit een heel andere benadering. Het enige criteria om te bepalen hoe robuust een dienstregeling is, is of aansluitingen gehaald worden. In deze paper<sup>18</sup> wordt echter een dubbele kostfunctie gebruikt om de optimale grootte van de supplementen en buffers te gebruiken; maximaliseer de robuustheid ( $R$ ) en minimaliseer gelijktijdig de (theoretische) reistijd van alle passagiers. Dit geeft aan dat een dienstregeling met systematisch

---

<sup>15</sup> Voor grote vertragingen zijn realtime interventies noodzakelijk, zie ook de eerste definitie van Kroon op de volgende pagina.

<sup>16</sup> Bedenk dat uitspraken zoals: “Bij een initiële vertraging van  $X$  minuten moet een robuuste dienstregeling een maximum totale vertraging van  $Y$  minuten garanderen.” heel erg systeem afhankelijk zijn en het dus bijzonder moeilijk is om daarover concrete uitspraken te doen.

<sup>17</sup> Dispatchingregel die bepaalt of een aansluiting verzekerd wordt of niet.

<sup>18</sup> A. Schöbel and A. Kratz. A bicriteria Approach for Robust Timetabling, pp.119-144. In: Robust and Online Large-Scale Optimization: Models and Techniques for Transportation Systems. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin/Heidelberg (2009).

20 minuten overstaptijd heel robuust is maar helemaal niet optimaal. Het is duidelijk dat de klemtoon van deze definitie helemaal anders is dan die van Goverde en Vromans. Ter volledigheid dient nog gezegd te worden dat Schöbel nog twee gelijkaardige kostfuncties voor robuustheid geeft die meer gericht zijn op de passagiers.

Een van de voornaamste namen in spoorwegoptimalisatie is Kroon van de Nederlandse Spoorwegen (NS) en de E.U.Rotterdam. Hij zegt het volgende over robuustheid.

*“In order to improve the average delays of the trains in a railway system, it is relevant to look for an optimal allocation of the time supplements and the buffer times in the timetable. Not only the total amount of time supplements and buffer times, but also their distribution among the processes in the timetable is relevant. [...] Note that the re-allocation of time supplements and buffer times may improve the robustness of a timetable against relatively small disturbances only. In case of large disturbances, traffic control measures are required and in such cases time supplements and buffer times are hardly effective. Therefore, most robustness related research focuses on insensitivity of the railway system against small disturbances.”<sup>7</sup>*

In dit citaat heeft Kroon het over de optimale grootte en spreiding van supplementen en buffers om de gemiddelde vertraging te minimaliseren. In het vervolg zegt hij dat dit bijdraagt tot een verbeterde robuustheid tegen kleine vertragingen. In de volledige versie wordt onder andere verwezen naar een UIC-richtlijn<sup>19</sup> die voorschrijft om 7% extra rijtijd als supplement toe te voegen. Andere studies zoals deze van Vromans<sup>10</sup> en Vansteenwegen et al.<sup>11</sup> gebruiken respectievelijk stochastische optimalisatie en marginale kosten voor de reizigers om de optimale supplementen te bepalen.

*“Robustness of a timetable has one or more of the following effects (i) initial disturbances can be absorbed to some extent so that they do not lead to delays, (ii) there are few knock-on delays from one train to another, and (iii) delays disappear quickly, possibly with light dispatching measures.*

*Both (i) and (iii) are a consequence of appropriately placed time supplements in the timetable, and (ii) is a consequence of appropriately placed buffer times between consecutive trains at certain locations. Note that, with light dispatching measures only, a timetable can only be robust against small disturbances.”<sup>20</sup>*

Om robuust te zijn, zegt Kroon, moet een dienstregeling voldoen aan drie eigenschappen. Ten eerste mag niet elk oponthoud of elke verstoringen resulteren in vertraging. Ten tweede moet het domino-effect dat een vertraagde trein veroorzaakt, beperkt blijven. En ten derde moeten vertragingen geabsorbeerd kunnen worden. Kroon zegt dat elk van deze eigenschappen een positieve invloed heeft op robuustheid, maar dat het hebben van deze eigenschap niet voldoende is om te stellen dat de dienstregeling robuust is. In de tweede alinea komen opnieuw de buffers en supplementen, alsook het gebruik van een beperkte dispatching ter sprake. Kroon erkent dat dispatching niet vermijdelijk is maar dat de impact ervan beperkt is.

Van de drie vermelde eigenschappen zijn de laatste twee, de voortgang van vertraging als secundaire vertraging en de absorptie van vertraging, reeds besproken in §1.3. De andere, het feit dat een

---

<sup>19</sup> International Union of Railways, Leaflet 451: “Timetable recovery margins to guarantee timekeeping - Recovery margins” (2000).

<sup>20</sup> L. Kroon, D. Huisman, and G. Maroti. Optimisation Models for Railway Timetabling, p. 135-154. In: I.A. Hansen and J. Pahl (eds), Railway Timetable & Traffic: Analysis, Modelling and Simulation. Eurailpress, Hamburg (2008).

verstoring niet onmiddellijk resulteert in vertraging is louter het gevolg van supplementen aangezien die ervoor zorgen dat er extra tijd beschikbaar is om zo'n situaties op te vangen.

De laatste omschrijving van robuustheid voor een spoorwegdienstregeling heeft gediend als basis voor de definitie die Infrabel hanteert. Dit is het onderwerp van de volgende paragraaf.

## §2.2: Definitie van Infrabel

In de documenten van Infrabel wordt een robuuste dienstregeling gedefinieerd als volgt:

*"Een robuuste dienstregeling is een dienstregeling met, bovenop de nodige bewerkingstijd voor alle operaties, ingebouwde buffertijden en reservetijden zodat storingen op één trein een zo minimale impact hebben op het verloop van andere treinen."*

In deze definitie komt het gebruik van supplementen in de vorm van reservetijden en buffertijden ook aan bod en is de voortgang van vertraging, de vertraging van de tweede orde, de (hoofd-) eigenschap van een robuuste dienstregeling<sup>21</sup>. De twee andere aspecten van de definitie van Kroon<sup>20</sup>, (i) en (iii), volgen uit deze omschrijving door het gebruik van de woorden 'buffertijden en reservetijden' en 'storingen' en zijn dus tussen de regels aanwezig.

Het grootste nadeel aan deze en de voorgaande definities is dat er geen rekening wordt gehouden met de reizigers. Enkel Schöbel deed er een –beperkte- poging toe om passagiers in rekening te nemen in de definitie van robuustheid. Zonder passagiersaantallen weegt een vertraging tijdens de daluren even zwaar als tijdens de spits, toch zal een vertraging in de spits meer invloed hebben op andere treinen, want de sporen zijn dan drukker bezet. Bovendien zijn de treinen in de spits ook drukker bevolkt wat maakt dat meer reizigers gehinderd worden. Zonder de reizigers mee te tellen, is een quasi lege trein die tien minuten later arriveert erger dan een volle trein met vijf minuten vertraging.

Hetzelfde geldt bij het garanderen van aansluitingen. Om te beslissen of de connecterende trein moet wachten op de aanvoerende trein indien die te laat is, zou het verschil tussen het aantal overstappende passagiers en het aantal opgehouden passagiers bij het verzekeren van de aansluiting, een bepalende factor moeten spelen. Het in rekening brengen van de passagiersaantallen zit in geen enkele van de tot nog toe geziene definities verwerkt. Daarom wordt in de volgende paragraaf een poging gedaan om vanuit het standpunt van de reizigers een concrete definitie van een robuuste dienstregeling te geven.

## §2.3: Definitie

De eigenschappen van robuustheid die tot hier toe aan bod zijn gekomen, hebben allemaal een gezamenlijk achterliggend doel. Namelijk ervoor zorgen dat de gerealiseerde reistijd zo dicht mogelijk

---

<sup>21</sup> Voor Infrabel komen reservetijden overeen met rijtijd supplementen en buffertijden met stoptijd supplementen. Voor Kroon<sup>20</sup> (en in dit werk) zijn buffers voornamelijk veiligheids buffers ('headway buffers') en dus niet gelijk aan de buffertijden in bovenstaande definitie.

Kroon zegt in zijn definitie dat het gebruik van veiligheids buffers voor een betere spreiding van treinen zorgt wat dan op zijn beurt zorgt voor minder conflicten bij vertragingen. In de definitie van Infrabel komt het gebruik van veiligheids buffer echter niet ter sprake.



aanleunt bij de geplande aankomst- en vertrektijdstippen. De mate van 'hoe dicht' kan op diverse manieren gemeten worden, cfr §1.3.

Zoals hierboven opgemerkt, ontbreekt in de huidige voorstellen het aspect van het aantal passagiers. Bovendien is een afweging noodzakelijk tussen de minimaal benodigde en de extra geplande reistijd. Want voor een dienstregeling die ontwikkeld is met behulp van robuuste optimalisatie, cfr §1.1, zullen de gerealiseerde tijdstippen perfect aansluiten bij de theoretische tijdstippen, maar wordt de totale reisduur onnodig veel verlengd.

In de definitie van robuustheid die hieronder voorgesteld wordt, is een poging gedaan om dit allemaal in rekening te brengen. De definitie ziet er bovendien redelijk anders uit dan deze van Kroon<sup>20</sup>, meer zelfs, de formulering hieronder is sterker dan deze van Kroon.

Vooraleer de definitie geformuleerd kan worden, is het noodzakelijk om onze invulling van het begrip 'extra reistijd' uit te leggen. Ruw gezegd is de extra reistijd van een reiziger alle tijd die deze reiziger in de praktijk langer onderweg is dan in de ideale situatie<sup>22</sup>. De totale extra reistijd (ten opzichte van de ideale situatie) is een combinatie van de aankomstvertraging en de extra geplande procestijden (buffers en supplementen). Indien een aansluiting gemist wordt, bestaat de aankomstvertraging uit twee delen; het wachten op een nieuwe aansluiting en de vertraging opgelopen na de overstap. Een voorbeeld zal dit verduidelijken. Wanneer iemand een overstap mist en daardoor met 37 minuten vertraging aankomt op zijn eindbestemming, kan die 37 bijvoorbeeld afkomstig zijn van 30 minuten wachten wegens een gemiste overstap en 7 minuten vertraging waarmee zijn laatste trein aankwam. Die 30 en 7 zijn beide extra reistijd, maar hun oorsprong is anders en daarom maken we dit onderscheid<sup>23</sup>. Beide extra reistijden kunnen eventueel ook een ander gewicht krijgen.

Er kan ook een onderscheid gemaakt worden tussen vertragingen van de eerste en tweede orde. Aangezien initiële vertragingen (eerste orde) niet altijd te vermijden zijn maar secundaire in het algemeen wel, dragen die ook elk apart bij tot de extra reistijd<sup>24</sup>.

Naast de aankomstvertraging maken ook extra geplande procestijden deel uit van de extra reistijd. De extra geplande procestijden bestaan uit de supplementen en buffers. Als een gepland supplement door een bepaalde trein niet gebruikt wordt en daardoor resulteert in langere stoptijd, dan is dit een onnodig oponthoud voor de reizigers. De optimale grootte van de supplementen en buffers is deze die de totale extra reistijd voor de passagiers minimaal maakt. Zo kan bijvoorbeeld een beetje extra reistijd zorgen dat meer mensen hun overstap halen. Het gebruik van supplementen met het oog op betere aansluitingen is reeds bestudeerd door Vansteenwegen et al<sup>11</sup>.

---

<sup>22</sup> De ideale situatie is deze waarin de gerealiseerde tijden exact samenvallen met de geplande dienstregeling die enkel en alleen bestaat uit minimale procestijden. In de ideale situatie zijn er dus geen supplementen of overstap buffers die de geplande reistijd verlengen.

<sup>23</sup> Deze aanpak is onder andere toegepast in M. Gatto, R. Jacob, L. Peeters, and P. Widmayer. Online Delay Management on a Single Train Line, pp.306-320. In: Algorithmic Methods for Railway Optimization. Lecture Notes in Computer Science (2007).

<sup>24</sup> Er zijn reeds tal van studies geweest om gegeven de totale vertragingen, deze van de eerste orde eruit te filteren. Toch blijkt dit telkens niet zo evident te zijn. In een verdere (literatuur) studie moet bekeken worden of het haalbaar is om dit onderscheid te maken.

Definitie: Robuustheid van een spoorwegdienstregeling

**Een dienstregeling die robuust is tegen kleine vertragingen minimaliseert de totale reistijd van alle passagiers in de praktijk, bij kleine vertragingen.**

**Een beperkte voortgang en snelle absorptie van verstoringen zijn noodzakelijk, maar niet voldoende om een robuuste dienstregeling te hebben. Bovendien kunnen verschillende gewichten toegekend worden aan verschillende soorten van extra reistijd.**

Enkele opmerkingen zijn vereist. Met 'in de praktijk' wordt de gerealiseerde reistijd en dus niet de geplande (theoretische) reistijd bedoeld. Dit betekent dat, gemiddeld gezien, in alle omstandigheden met kleine vertragingen de passagiers het snelst ter plaatse zijn in een systeem met een robuuste dienstregeling. Uit de definitie volgt dat robuustheid overeenkomt met een betrouwbare minimaal gemiddelde reistijd van de passagiers. Zoals reeds gezegd in de vorige paragraaf, zorgt het gebruik van passagiersaantallen ervoor dat de focus op de spitsuren ligt. Aangezien er dan het meest treinen rijden, is het aangeraden om een planning op te stellen voor tijdens de spitsuren en dan eventueel enkele aanpassingen te maken voor de daluren.

Een mogelijke uitbreiding is het definiëren het concept van xx%-robuustheid als een dienstregeling die in xx% van de gevallen de minimale reistijd garandeert. Er zijn echter enkele parameters die mee bepalen of een dienstregeling robuust is of niet. Bijvoorbeeld de dispatchingstrategie en de keuze van de gewichten<sup>25</sup>. Omdat dit onderzoek zich toespitst op de planningsfase en niet op de uitvoering, kan verondersteld worden dat de dispatchingstrategie niet afhangt van de dienstregeling of reeds vastligt voor het opstellen van de dienstregeling.

Wat het tweede deel van de definitie betreft, sluiten we aan bij wat Kroon zegt. Indien een vertraagde trein veel andere ophoudt, of indien vertragingen niet geabsorbeerd worden, of de kleinste verstoring tot vertraging voor passagiers leidt, dan is een dienstregeling niet robuust. Maar zelfs indien het aan elk van die eigenschappen voldoet, wil dit niet zeggen dat het robuust is. Denk maar aan een dienstregeling die elk proces voorziet van 10 minuten supplement. Aan de hand van de gewichten kan de impact van vertraging, een gemiste overstap of van langere procestijden door supplementen op de passagier gemeten worden. Een supplement zorgt voor een langere reistijd maar ook voor minder vertraging, deze tegenstrijdigheid kan verholpen worden door een gepaste afweging te maken in de kostfunctie of zoals bijvoorbeeld in de studie van Vansteenwegen et al.<sup>11</sup>, waarin de ideale supplement grootte bepaald wordt. De optimale spreiding van supplementen en buffers, waarvan sprake was in het voorlaatste citaat in §2.1, zit op een gelijkaardige manier in deze definitie verwerkt.

Een van de voordelen van deze definitie is de concreetheid. Gegeven twee dienstregelingen voor hetzelfde systeem, de vertrek- en aankomsttijden in de praktijk van beide en de passagiersaantallen, dan kan op basis van deze definitie eenduidig gezegd worden welke planning het meest robuust is.

---

<sup>25</sup> Het bepalen van de grootte van de gewichten en het opdelen van de types extra reistijden zijn een fundamenteel deel van het onderzoek. Eerdere resultaten die op gelijkaardige manier verkregen zijn, zijn gepubliceerd in Vansteenwegen et al.<sup>11</sup> en in R.M.P. Goverde. Synchronization control of scheduled train services to minimize passenger waiting times. In: Proceedings of the 4th TRAIL Annual Congress (1998).

Een ander voordeel is dat de definitie de benodigde kostfunctie eenduidig bepaald. Namelijk minimaliseer de reisminuten van alle passagiers in de praktijk. Merk op dat dit niet hetzelfde is als de theoretische procestijden want daar ontbreken de vertragingen. Het is dus wel noodzakelijk om informatie te hebben over de te verwachten vertragingen bij het opstellen van een dienstregeling.

In robuustheid gerelateerde literatuur is vaak sprake van de prijs van robuustheid. Dit is de kost (in de vorm van een langere geplande reistijd) die men betaald om een robuuste dienstregeling te krijgen. De dienstregeling met de laagste prijs van robuustheid is deze zonder supplementen.

We lijken dus een prijs te betalen (langere reistijden in de planning), maar in de praktijk daalt het aantal passagiersminuten. Echter, voor sommige passagiers, die nooit een overstap missen, zal de reistijd langer worden. Door robuustheid te associëren met minimaal gerealiseerde reistijden, zullen er geen overbodige supplementen zijn in een robuuste dienstregeling en vervaagt de betekenis van de prijs van robuustheid. Als we in theorie langer onderweg zijn dan nu, maar in de praktijk door een betere planning minder lang, dan maakt het in feite niet uit hoe die planning er in theorie uitziet.

## Hoofdstuk 3: Conclusie

In dit rapport is een concrete definitie gegeven van wat robuustheid van een spoorwegdienstregeling zou moeten inhouden. De definitie zelf is gericht op de reizigers. Het is dus mogelijk dat dit niet de beste of goedkoopste oplossing is voor de spoorwegmaatschappij zelf, maar naar klantenservice en betrouwbaarheid toe, zijn wij ervan overtuigd dat dit de beste oplossing is. Bovendien hebben voorgaande studies aangetoond dat zo een robuuste planning weinig tot geen extra mensen of middelen vereist, zie Vansteenwegen et al<sup>11</sup>.

Verscheidene elementen die bijdragen tot de robuustheid van een dienstregeling zijn voorgesteld en besproken. Zo is besloten dat een beperkte voortgang van vertraging, een grote absorptiesnelheid, en het feit dat niet elke verstoring onmiddellijk resulteert in vertraging, noodzakelijke maar niet voldoende voorwaarden zijn voor een robuuste dienstregeling.

Op de vraag hoe robuustheid gemeten moet worden, is een antwoord gevonden; met behulp van een kostfunctie die gewichten toekent aan 'extra reistijden'. Aan de hand van deze kostfunctie kunnen dienstregelingen vergeleken worden om te zien welke het meeste robuust is.

Een belangrijk punt is dat de focus van dit onderzoek bij de planningsfase ligt. Het opstellen van een robuuste dienstregeling en niet de uitvoering is prioritair. Dit betekent dat het vastleggen van een dispatchingstrategie in dit onderzoek van ondergeschikt belang is. Bij het meten van de robuustheid van nieuwe dienstregelingen zal gebruik gemaakt worden van simulatie om zo het effect van mogelijke vertragingen tijdens de uitvoeringsfase op te meten. Tijdens het simuleren van de realiteit zal een dispatchingstrategie nodig zijn om mogelijke conflicten op te lossen. Daarvoor zal ofwel de huidige dispatchingstrategie ofwel de volgende regel gebruikt worden: 'doe wat het beste is voor alle passagiers'. Bovendien hebben we robuustheid enkel gedefinieerd voor kleine vertragingen en zeggen we niets over het geval waarin grote verstoringen gebeuren.

**Een dienstregeling die robuust is tegen kleine vertragingen minimaliseert de totale reistijd van alle passagiers in de praktijk, bij kleine vertragingen.**